

УДК 621.7

А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Фадеев, С. И. Чернышов**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ**

Рассмотрены перспективы использования генеративных технологий в двигателестроении. Определены тенденции интеграции Rapid Prototyping, Rapid Tooling и Rapid Manufacturing для скорейшего получения нового конечного продукта. Приведены производственные возможности центра высоких генеративных технологий при НТУ «ХПИ».

В настоящее время в технически развитых странах используется более 15 интегрированных технологий послыйного выращивания изделий (Rapid Prototyping) [1, 2, 5-27]. Основным их достоинством является возможность существенного снижения продолжительности полного цикла изготовления изделий, представляющего собой сумму трех этапов: создание компьютерной модели, ее материализацию и постобработку для придания изделию требуемых потребительских свойств [1, 4].

Основным сдерживающим фактором при создании новой высокотехнологичной, сложной продукции в двигателестроении является НИОКР (точнее их продолжительность). Нужно не только спроектировать изделие, но и провести весь комплекс исследовательских, опытно-конструкторских, экспериментальных работ, технологическую подготовку производства и др. Rapid Prototyping (RP) решает задачу сокращения сроков НИОКР настолько значительно (в несколько, а иногда и в десятки раз), что, несмотря на высокие затраты, связанные с приобретением специального оборудования, все крупные западные фирмы имеют у себя на вооружении не только отдельные RP-машины, но и целые комплексы – RP-центры. Они оснащаются различными машинами разных фирм, специализирующихся на отдельных направлениях данных технологий.

Идея генеративного изготовления прототипов, как показало время, оказалась исключительно продуктивной. Об этом свидетельствует то большое количество RP способов, которое на сегодня предложено рынку технологий. Определяющей тенденцией их развития является стремление интегрировать Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) и Rapid Manufacturing (RM), т. е. максимально использовать все преимущества RP-идеологии для скорейшего получения нового конечного продукта.

Одним из наиболее универсальных RP способов является лазерная стереолитография (Stereolithography Apparatus – SLA), обеспечивающая надежное получение 3D объектов многоцелевого

назначения. Применительно к двигателестроению можно выделить следующие из них:

- конструкторские и дизайнерские прототипы при создании макетов изделий, в том числе в сборе. Важное значение имеет возможность выполнения дизайна уже на этапе виртуального прототипирования, а с другой стороны, в твердотельном варианте возможна визуализация газо- и гидродинамических потоков внутри моделей, тепловых полей и полей напряжений в деталях и их соединениях;
- формообразующая оснастка при различных видах точного литья, а также оснастка из других материалов по созданным моделям;
- мастер-модели при изготовлении электродов для электроэрозионной обработки;
- реконструирование и воссоздание различных объектов по данным координатно-измерительных машин и других видов зондирования трехмерных объектов.

Перечисленное указывает на объективную необходимость интеграции ускоренного прототипирования, ускоренного создания инструментального обеспечения и ускоренного изготовления конечного продукта в рамках единой технологии применительно к двигателестроению. Но именно SLA технология демонстрирует тот факт, что геометрические, физические, механические и др. свойства 3D RP моделей в ряде случаев еще отличаются от свойств аналогичных изделий, полученных традиционными методами. Выравнивание этих различий достигается путем последующих доработок – постпроцессов.

Последующие технические приемы являются, как правило, способами формовки, при которых RP-установки созданную и обработанную деталь используют как первоначальную модель.

При этом чаще всего применяются методы литья: для металлических материалов преимущественно метод прецизионного литья, а также литье в кокиль, литье под давлением и центробежное литье; для пластмасс, прежде всего, метод вакуумного литья и литья под давлением. Для деталей из пластмассы используется, кроме того, литье в силиконовые фор-

мы.

Путем выполнения последующих процессов могут изготавливаться как дубликаты прототипа, так и формовочные инструменты. Изготовление мелких серий деталей посредством выше описанных последующих методов часто быстрее и дешевле, чем создание прототипа в RP-установке. Изготовление формовочных инструментов путем матрицирования RP-модели называется косвенным Rapid Tooling. Прямое изготовление формовочного инструмента посредством RP-процесса, например, посредством лазерного спекания или лазерного плавления с дополнительной обработкой называется непосредственным Rapid Tooling.

Именно это обстоятельство объективно обуславливает интеграцию RP, RT, RM. В то же время именно это обстоятельство требует тщательного анализа при выборе базового способа RP технологии и интегрируемых с ним других процессов.

Концептуальной отработке идеи продукта способствует создание дизайн-прототипов на виртуальном и реальном уровнях. На этом этапе преимущество отдается таким способам, как MJM (Multi Jet Modeling – многоструйное воспроизведение), TDP (Three Dimensional Printing – трехмерная печать) и др.

На этапе создания геометрических прототипов, когда оценивается форма, размеры, а свойства материалов не имеют значения, более эффективны способы SLA, SLS (Selective Laser Sintering – избирательное лазерное спекание), LOM (Laminated Object Manufacturing – изготовление слоистых объектов) и FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование оплавлением) технологии.

Функциональные прототипы, требующие изготовления из материала конечного продукта, преимущественно изготавливают по способам спекания листовой модели и постпроцессов – вакуумного литья, литья под давлением и др.

Технические прототипы и опытная партия изготавливаются способами, обеспечивающими все функциональные, эстетические и экологические свойства конечного продукта. В этом плане серьезное внимание уделяется тем способам RP, которые напрямую обеспечивают получение конечного продукта с наперед заданными свойствами, без последующей обработки.

Изложенное позволяет представить обобщенную структуру высоких интегрированных технологий (рис. 1), базирующихся на RP, RT, RM (RPTM).

Здесь к рассмотренному выше добавим понятие прямого и непрямого изготовления собственно изделия на этапе RP материализации. Такими генеративными способами, как SLS, FDM и др., можно обеспечить изготовление изделий на уровне конеч-

ного продукта.

Непрямое изготовление реализуется через мастер-модели и др. по технологии литья, гальванопластики и т. д. На завершающем этапе используются методы модификации материала поверхностного слоя – имплантация, покрытия, металлизация, лазерное упрочнение и т. д., или процессы финишной механической обработки – полирование, доводка, выглаживание, прецизионное и ультрапрецизионное точение, растачивание, фрезерование.

Существующая в настоящее время научно-техническая информация и опыт практического использования позволяют заключить, что интегрированные технологии на базе генеративных способов создания изделий могут эффективно использоваться в двигателестроении.

Учебно-научно-производственный центр высоких генеративных технологий при НТУ «ХПИ»

В 2001 г. впервые в Украине создан центр высоких генеративных технологий при НТУ «Харьковский политехнический институт». В это учебно-научно-производственное объединение вошли Институт сверхтвердых материалов НАНУ, ЗАО «Верификационные модели», страховая компания «Лемма», Земельный банк, АО «Научно-технологический институт транскрипции, трансляции, и репликации», Государственное предприятие «Машиностроительный завод ФЭД», Институт технологии машиностроения.

Центр оснащен современным оборудованием, которое организовано в виде ряда систем: системы лазерной стереолитографии на базе установки SLA 5000, системы лазерного избирательного спекания на базе установки Vanguard Si2 SLS и измерительной системы на базе сканирующей установки Imetric Iscan II.

Центр реализует идеологию генеративных технологий макроуровня – прямой переход от 3D CAD электронного образа к твердотельному объекту путем послойного его представления и последующего послойного выращивания.

Система лазерной стереолитографии на базе установки SLA 5000

Система лазерной стереолитографии включает установку SLA 5000 фирмы 3D Systems (США); компьютерную станцию подготовки процесса; камеру PCA 500 для окончательной полимеризации изделия, выращенного из фотомономера; вакуумную камеру производства физико-технического института НАНУ (Харьков); низкотемпературный шкаф; моечную камеру.

Установка SLA 5000 (рис. 2) относится к новому поколению систем ускоренного формообразо-

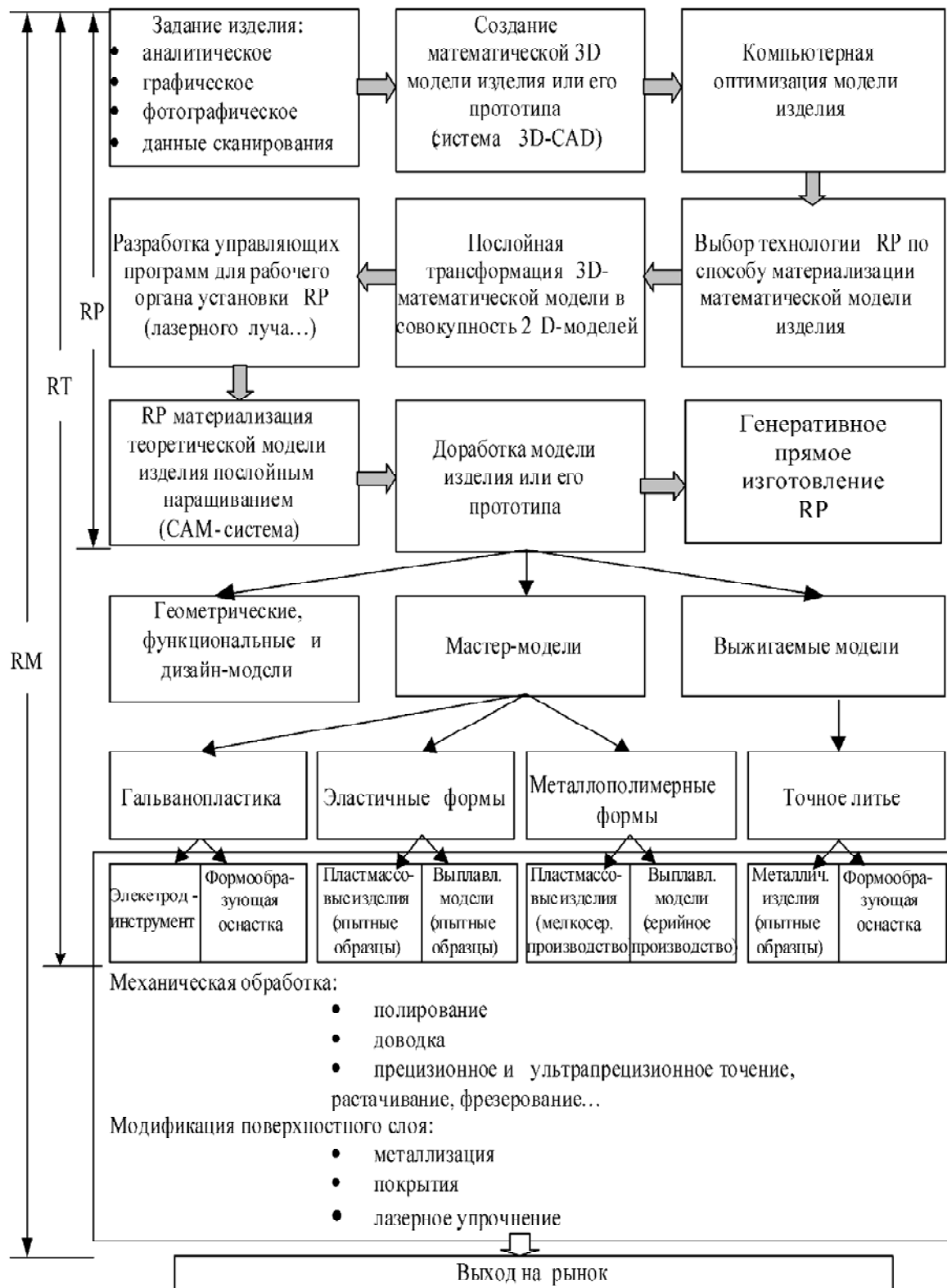


Рис. 1. Обобщенная структура высоких интегрированных технологий на базе Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT), Rapid Manufacturing (RM)

вания изделий. Она включает твердотельный лазер мощностью не менее 216 мВт и длиной волны 354,7 нм, систему фиксированных перемещений платформы, которая обеспечивает получение толщин слоев в пределах $0,05 \div 0,15$ мм, оптическую систему управления лазерным лучом с диаметром светового пятна $0,23 \div 0,28$ мм и скоростью сканирования до 5000 мм/с, ванну объемом 253,61 литра. Допустимый вес построенного изделия составляет 68,04 кг при максимальных габаритах $508 \times 508 \times 584$ мм ($X \times Y \times Z$).

Компьютерная станция подготовки процесса при работе с STL-файлом выполняет следующие функции: рациональное размещение изделия перед построением на рабочей платформе; трансформация 3D CAD модели в совокупность 2D CAD плоских сечений (с заданными толщинами слоев), при одновременном контроле качества описания исходной модели по сечениям (соблюдение условий непрерывности поверхности и контроль минимально допустимой толщины стенок изделия); подготовка программы управления движением лазерного луча, определение параметров процесса, ориентации модели, автоматическое или в ручном режиме создание элементов поддержки (технологических опор).

Компьютер системы управления установкой SLA 5000 обеспечивает: автоматическое управление и контроль процесса послойного построения изделия; визуальный контроль за текущими параметрами построения (начало и конец времени построения, мощность лазера, степень выполнения и др.); автоматическое выключение установки в случае завершения или отклонения от заданных условий построения.

Камера PCA 500 предназначена для окончательной полимеризации изделия. Она оснащена источниками ультрафиолетового излучения – 8 флуоресцентных ламп общей мощностью 640 Вт, а также рефлекторными зеркалами. Изделие помещается на столе $\varnothing 800$ мм, который вращается со скоростью 1 об/мин. Рефлекторные зеркала обеспечивают равномерное освещение объекта.

В вакуумной камере выполняются работы с рабочими смесями при изготовлении гибких (силиконовых) пресс-форм на этапе тиражирования.

Низкотемпературный термошкаф предназначен для термообработки изготовленного изделия с целью повышения его механических свойств после полного отверждения, а моечная камера для промывки готовых изделий и удаления технологических опор после построения.

Система избирательного лазерного спекания на базе установки Vanguard Si2 SLS

Система избирательного лазерного спекания включает следующие составляющие: установку для

избирательного лазерного спекания Vanguard Si2 SLS производства фирмы 3D Systems (США); шкаф управления; компьютерную сеть; охладитель; станцию отрыва BOS; высокотемпературную печь Laser Oven; гидравлический подъемник; систему обеспечения газообразным азотом; смеситель порошков.

Установка Vanguard Si2 SLS (рис. 2) предназначена для быстрого производства (Rapid Manufacturing) конечного изделия, т. е. она без стадии получения модели прототипа непосредственно способна обеспечивать производственный процесс.

Она оснащена современными системами сканирования, новым компьютерным оборудованием, отличается оптимизированными параметрами процесса выращивания, повышенной точностью размеров и качества поверхности, включая кромки. Установка имеет два режима работы – режим высокого разрешения и режим высокой скорости изготовления (увеличение до 50 %).

Установка оснащена CO_2 лазером мощностью 100 Вт. Скорость сканирования в пределах $7500 \div 10000$ мм/с, что в два раза выше, чем на установке SLA 5000. Рабочее пространство $381 \times 330 \times 457$ мм ($X-Y-Z$). Компьютерная станция на основе процессора Pentium III, операционная система Windows 2000.

Габариты рабочей установки $2,13 \times 1,33 \times 1,98$ м. Шкаф управления содержит управляющий компьютер и монитор. Охладитель, как вспомогательный агрегат, предназначен для отвода тепла от лазерной системы.

Станция отрыва BOS предназначена для очистки деталей от лишнего порошка и его последующей фильтрации с целью повторного использования.

Высокотемпературная (до 1070°C) печь Laser Oven предназначена для спекания металлических и керамических порошков, выжигания связующего вещества, расплавления бронзы и инфильтрации. Имеет автономное программное обеспечение.

В ходе избирательного лазерного спекания из порошковых материалов формируются объемные геометрические тела. Первый слой материала, оплавленного под действием лазерного CO_2 луча, создается на рабочей платформе, которая может перемещаться по оси Z. Работа лазерного луча контролируется таким образом, что поверхность слоя порошка, нагреваемого практически до точки плавления, воспроизводит ИК-изображение полученного сечения. Поступающей в эту зону энергии лазерного луча достаточно для спекания материала в однородный слой. На него наносится новый слой порошка с помощью специального роликового механизма. Процесс повторяется до завершения наращивания всего объема изделия. Специальные поддерживающие конструкции в данном процессе не требу-



Установка лазерной стереолитографии SLA-5000 и управляющая компьютерная станция



Рабочая станция подготовки процесса



Камера ультрафиолетового отверждения PCA-500



Вакуумная камера



Низкотемпературный шкаф для упрочнения готовых деталей

Рис. 2. Система лазерной стереолитографии на базе установки SLA 5000



Рис. 3. Система избирательного лазерного спекания на базе установки Vanguard Si2

ются, поскольку их роль выполняет масса порошка в пределах рабочей емкости.

Измерительная система на базе сканирующей установки Imetric Iscan II

Разработка систем оцифровки изображения, основанных на триангуляции и интерференционном проецировании, началась пятнадцать лет назад. Такие системы производят сканирование поверхности произвольной формы в трех измерениях. Сегодня эффективные системы оцифровки используются

в промышленности для контроля качества, когда данные сканирования служат для сравнения (верификации) фактической геометрической формы детали с ее 3D CAD моделью.

Оптико-цифровая сканирующая система Iscan II фирмы Imetric (Швейцария) предназначена для пространственного сканирования объектов с целью получения трехмерного изображения, а также сопоставления данных обмера с 3D CAD моделью (рис. 4). Система состоит из следующих компо-

нентов: сенсорная (сканирующая) головка с цифровой камерой разрешением 1280×1024 пикселей и проектором; источник света с ксеноновой лампой высокого давления мощностью 1000 Вт; волоконно-оптический кабель для подсоединения источника света к проектору; компьютер управления и обработки данных с программным обеспечением, совместимым с Windows NT (Windows 2000); углеволоконные калибровочные пластины 300×300 и 600×600 мм со стандартными визирными маркерами (для небольших объектов); фотограмметрическая система.

Фотограмметрическая система состоит из следующих компонентов: метрологической фотокамеры с традиционной оптикой (фокусное расстояние 24 мм), встроенной фотовспышкой, интегрированным компьютером Pentium (Windows NT) и цветным монитором; фотограмметрического программного обеспечения, позволяющего выполнять следу-

ющие операции: распознавание образа с помощью фотокамеры, автоматическое измерение объектов с наклеенными светоотражающими маркерами, идентификацию целей, автоматическое ориентирование объекта, трансформацию координат реперных точек и геометрических поверхностей для фотограмметрического анализа и визуализации.

Вспомогательное оснащение системы Iscan II включает набор светоотражающих маркеров различных диаметров, набор углеволоконных стандартных стержней с маркерами, покрытыми светоотражательным веществом длиной 2 м и пр. Габариты пространства возможных измерений от $100 \times 100 \times 100$ мм до $10000 \times 10000 \times 10000$ мм.

Система сканирования Iscan II в течение нескольких минут производит съемки объекта в виде множества точек поверхности и регистрирует их автоматически в одной общей системе координат X-Y-Z. Объект представляется в виде последовательно от-



Рис. 4. Измерительная система на базе сканирующей установки Imetric Iscan II

сканированных поверхностей.

Преимущества данной оптической цифровой системы: высокая скорость измерений; высокое разрешение по сечениям; мобильность; легкость использования.

После сканирования с помощью специального программного обеспечения производится ручное «сглаживание-сшивание» всех поверхностей в единый объект. При необходимости измеряемый объект может быть представлен в триангуляционном формате (STL-файл), с которым возможно далее работать в системах RP. Полученный STL-файл используется для контроля качества изготовления изделия (верификации) путем совмещения его оцифрованного изображения с 3D CAD моделью с учетом заданных предельных отклонений.

Заключение

В настоящее время в двигателестроении Украины для повышения конкурентоспособности продукции необходимо активно использовать интегрированные технологии генеративного создания изделий.

Ускоренное прототипирование целесообразно выполнять в специализированном Центре высоких генеративных технологий при НТУ «ХПИ» на основе RPM-аутсорсинга [3].

На стратегическом уровне это позволит: сократить время разработок и запуска в производство новых изделий; уменьшить необходимость инвестиций в основные фонды; гибко реагировать на изменения на рынке и внутри компании; сконцентрировать ресурсы и усилия на участках, определяющих конкурентоспособность продукции и предприятия в целом.

Тактические преимущества RPM-аутсорсинга: повышение качества, экономия ресурсов, снижение издержек, повышение производительности труда, отсутствие необходимости в расширении штата компании, гарантия профессионализма, доступ к передовым технологиям, обеспечение эффективности производства, возможность использования чужого опыта.

Перечень ссылок

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография: 2-е изд., перераб. и доп. / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Верезуб Н.В., Витязев Ю.Б., Доброскок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.
2. Кулагин В.В., Скородумов С.В. Изготовление оснастки с использованием стереолито-графических моделей // Литейное производство. – 1999. – № 7. – С. 11-14.
3. Леушников А.В., Скородумов С.В. Аутсорсинг услуг по быстрому прототипированию и изготовлению формообразующей оснастки // Литейное производство. – 2004. – № 4. – С. 39-42.
4. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – Санкт-Петербург: Изд. дом ПИТЕР, 2004. – 560 с.
5. Пат. 4752352 США, МКИ В 23 С 14, 23. Apparatus and method for forming an integral object from laminations.
6. Шишковский И.В. Послойное селективное лазерное спекание порошковых композиций и синтез функциональных объемных изделий // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. Ч. 1. – Харьков: ННЦ ХФТИ ИПЦ «Контраст». – 2003. – С. 143-159.
7. DPrinting // Rapid Prototyping Report. – 1998. – Vol. 8. – № 5. – P. 5.
8. Carter W.T., Jones M.G. Direct Laser Sintering of Metals // Beitrag zum Solid Free form Fabrication Symposium. – Austin, Texas. – 1991.
9. Cheng W., Fug J.Y.H., Nee A.Y.C., Wong Y.S., Loh H.T., Miyazawa T. Multiobjective optimization of the part building orientation in Stereolithography // Rapid Prototyping Journal. – 1995. – Vol.1, № 4.
10. Gebhardt A. Rapid Prototyping: Werkzeuge fur die schnelle Productentwicklung. – Munchen, Wien; Hanser, 1996. – 407 s.
11. Geiger M., Steger W., Greul M., Sintel M. Multiphase Jet Solidification // EARP newsletter. – 1994. – № 3. – P. 8-9.
12. Geiger M. Proze/planung und Proze/Sfuehrung bei Generativen Fertigungsverfahren. – Stuttgart: Universitat, 2000. – 104 s.
13. Greui M., Pintat T. Kostenreduzierung in der Produktentwicklungsphase durch die Integration von Fused Deposition Modeling. – Dusseldorf: Beitrag zur VDI – Fachtagung, 1994.
14. Heferkamp H. et al. Rapid Manufacturing of Metal Parts by LASER Sintering // Beitrag zur 27th ISATA. – Stuttgart. – 1995.
15. Hull C. Apparatus for Production of Three Dimensional Objects by Stereolithography. U.S. Patent 4.575.330, March 11, 1986.
16. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. – USA: SME, 1992. – 434 p.
17. Konig W., Celi J. Rapid Metal Prototyping – Verfahren zur Direkt herstellung metallischer Bauteile und Prototypwerkzeuge // VDI-Z. – 1994. – Vol.136. – № 7/8. – S. 57-660.
18. Konig W.A. u.a. Rapid Prototyping. Bedarf und Potentiale // VDI-Z135. – 1993. – Vol.8, S. 92-97.
19. Konig W.A. u.a. Stereolithographi // VDI-Z. – 1994.

- Vol.136,11/12. – S. 44–49.
20. Kruth J.P. Material Increment Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques // Annals of the CIRP. – 1991. – Vol.40/2. – P. 603-614.
 21. Lan P.T., Chou S.Y., Chen L.L., Gemmill D. Determining fabrication orientation for Rapid Prototyping with Stereolithography Apparatus // Computer-Aided Design Journal. – 1997. – Vol.29. – № 1.
 22. Leu M.C., Zhang W., Sui G. An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Prototyping // Annals of CIRP. – 2000. – Vol.49/1.
 23. Mariques-Frayre J.A., Bourell D.L. Selective Laser Sintering of Cu-Pb/Sn Solder Powders // Beitrage zum Solid Freeform Fabrication Symposium. – Texas: Austin. – 1991.
 24. Neue W. Rapid Prototyping Verfahren FDM vor Ort beim Anwender // Konstruktionspraxis. – 1994. – № 11.
 25. Pak S. Laminated Object Manufacturing // Medical Device. – 1994. – № 11. – P. 47-48.
 26. Pham D.T., Dimov S.S. An overview of Rapid Prototyping and Rapid Tooling // Symposium on the 50 anniversary of Department of Manufacturing Engineering of Budapest University of BUTE. – Budapest. – 2001. – P. 75-88.
 27. Susila B., Shiena C., Radhakrishnan P. Evaluation of surface durability of sand casting tooling made by fused deposition modeling process // Rapid Prototyping and Rapid Tooling Technologies. – India: RPSI. – 2002. – P. 29-33.

Поступила в редакцию 24.07.2007

Розглянуто перспективи використання генеративних технологій у двигунобудуванні. Визначено тенденції інтеграції Rapid Prototyping, Rapid Tooling та Rapid Manufacturing для якнайшвидшого одержання нового кінцевого продукту. Наведено виробничі можливості центру високих генеративних технологій при НТУ «ХПІ».

Prospects of use generative technologies in propulsion engineering are considered. Tendencies for integration of Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Rapid Manufacturing for the prompt reception of a new end-product are determined. A production potentialities of the center for high generative technologies are shown at NTU «KhPI».